

П И С Ь М А
В ЖУРНАЛ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЙ
И ТЕОРЕТИЧЕСКОЙ ФИЗИКИ

ОСНОВАН В 1965 ГОДУ
ВЫХОДИТ 24 РАЗА В ГОД

ТОМ 63, ВЫПУСК 6
25 МАРТА, 1996

Письма в ЖЭТФ, том 63, вып.6, стр.387 - 391

© 1996г. 25 марта

СТОЛКНОВЕНИЕ КОМЕТЫ С ЮПИТЕРОМ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ
ГЛУБИНЫ ПРОНИКНОВЕНИЯ ОСКОЛКОВ ПО МОЛЕКУЛЯРНЫМ
СПЕКТРАМ

А.А.Бережной, Б.А.Клумов, В.Е.Фортов⁺, В.В.Шевченко*

*Государственный институт им.Штернберга
117979 Москва, Россия*

**Институт Динамики Геосфер РАН
117979 Москва, Россия*

*⁺Научно-исследовательский центр теплофизики импульсных воздействий
127412 Москва, Россия*

Поступила в редакцию 13 февраля 1996 г.

После падения осколков кометы Шумейкер-Леви 9 на Юпитер в верхней атмосфере наблюдались молекулы, часть из которых образовалась в результате химических реакций в ударно-сжатом газе при взрыве фрагментов кометы и была выброшена в верхнюю атмосферу ударной волной. В процессе расширения первоначально горячего газа происходила закалка указанных молекул, поэтому эти молекулы являются своеобразной "памятью" об ударных процессах, которые происходили в области генерации сильной ударной волны. Излучение таких молекул было зарегистрировано как наземными наблюдателями, так и космическим телескопом Хаббла. В настоящей работе на основании данных о содержании в верхней атмосфере Юпитера молекул, синтезированных ударом, мы оцениваем глубину проникновения и энергию наиболее крупных осколков кометы.

PACS 96.35.-j, 96.30.Kf, 94

Столкновение кометы Шумейкер-Леви 9 (SL9) с Юпитером в июле 1994 г. привело к значительным возмущениям атмосферы Юпитера. Один из ключевых вопросов – определение глубины проникновения осколков кометы в атмосферу Юпитера и их энергии.

В работе [1] оценивался размер и энергия наиболее крупных осколков SL9 на основании кривых блеска, полученных на космическом аппарате Галилео, который непосредственно наблюдал процесс удара. Согласно этим оценкам,

наиболее крупные фрагменты кометы SL9 имели диаметр примерно 1.5-2.5 км (а энергия E_0 ледяных осколков при их скорости входа в атмосферу ≈ 60 км/с составила $E_0 \sim 10^{29} - 10^{30}$ эрг). Глубина h_e проникновения таких фрагментов составляет $-175 \leq h_e \leq -100$ км (высота отсчитывается от уровня, где давление окружающего газа $p \approx 1$ бар).

Существует и другая точка зрения [2], согласно которой при столкновении кометы SL9 с Юпитером имело место неглубокое проникновение относительно мелких осколков (характерный размер которых $\approx 0.4 - 0.7$ км) в атмосферу, при этом характерная глубина их проникновения составляет $h_e \approx -30$ км. В настоящей работе мы пытаемся оценить размер наиболее крупных осколков кометы SL9 и глубину их проникновения, используя данные о содержании молекул, синтезированных при ударе. Этот метод является независимым и, как мы надеемся, в совокупности с другими моделями позволит оценить параметры SL9.

Процесс столкновения происходил на обратной стороне Юпитера, поэтому существенные для нас наземные наблюдения (включая космический телескоп Хаббла (HST)) проводились лишь после выхода мест ударов на лимб.

Наблюдения проводились в широком диапазоне длин волн и обнаружили интенсивное излучение молекул, многие из которых не были зарегистрированы в атмосфере планеты до удара. Каково происхождение этих молекул: синтезированы ли они в процессах ударной химии, или же эти молекулы кометного происхождения, доставленные в атмосферу в процессе входа осколка кометы? Попытаемся ответить на этот вопрос исходя из наблюдательных данных.

Наиболее интенсивная эмиссия была зафиксирована в полосах метана [3] примерно через полчаса после ударов. Излучение молекул генерировалось в стратосфере, при давлении газа $p \sim 10^{-5}$ бар (высота $h \approx 250 - 300$ км). Также наблюдались эмиссии других углеводородов C_2H_2 , C_2H_4 и C_2H_6 [4], причем парциальные концентрации ненасыщенных углеводородов q_j ($j = C_2H_2, C_2H_4$) выросли примерно на порядок.

Из кислородсодержащих соединений наблюдались CO, H_2O и OCS, при этом CO был основным O-соединением [5]; $q_{CO} \approx 4 \cdot 10^{-5}$ ($p \leq 3 \cdot 10^{-4}$ бар).

Из азотсодержащих соединений наблюдались HCN и NH_3 ; $q_{HCN} \sim 10^{-7}$ ($p \leq 10^{-4}$ бар) [6], $q_{NH_3} \sim 10^{-8}$ ($p \sim 0.1$ бар) [7].

Из серосодержащих соединений наблюдались H_2S , CS, CS_2 , OCS, S_2 [8]; по результатам радионаблюдений [5] $q_{CS} \approx 5 \cdot 10^{-8}$ ($p \sim 7 \cdot 10^{-4}$ бар), $q_{OCS} \approx 2 \cdot 10^{-7}$ ($p \leq 10^{-3}$ бар).

HST [8] зарегистрировал относительные концентрации серосодержащих соединений: $q_{S_2} : q_{H_2S} : q_{CS_2} \sim 3000 : 30 : 1$. Эти соединения наблюдались на Юпитере впервые и лишь в местах падений наиболее крупных фрагментов SL9 (G, комплекс K/W). Это не означает, что в местах ударов других осколков этих соединений не было, просто HST проводил подобные исследования только наблюдая за местом падения фрагмента G. Отметим, что все рассмотренные молекулы практически не подвергались фотолизу на указанных временах.

В оптическом диапазоне наблюдалось свечение атомов металлов в местах падений фрагментов L и Q1, среди них наиболее интенсивные эмиссии принадлежали щелочным металлам Na, Li, K [9]. Источник излучения располагался на высотах $h \geq 250$ км ($p \leq 10^{-4}$ бар). Согласно [9], их масса в апертуре ($2 \cdot 10^7$ км²) составила для Na, Li, K $\sim 10^6$ г, 10^5 г, $5 \cdot 10^6$ г, соответственно. Обычно атомы металлов в атмосфере Юпитера не наблюдаются, поэтому можно считать, что они кометного происхождения.

Большинство из рассмотренных соединений находилось на стратосферных высотах $h \sim 200 - 300$ км. Осталось только понять, как они попали на эти высоты.

Каждый фрагмент кометы SL9 был окружен пылевым облаком - комой. Характерный размер пылинок, которые достигли атмосферы, - порядка одного микрона (более мелкие пылинки захватываются магнитным полем Юпитера). Такие пылинки тормозятся как раз на высотах $\sim 200 - 300$ км. Учитывая, что характерная масса комы для крупных осколков SL9 $\sim 10^{10}$ г [10], получаем, что торможение комы в верхней атмосфере вполне может объяснить наблюдаемую интенсивность свечения атомов металлов.

Другим источником таких атомов может быть унос материала с поверхности осколка в результате абляции при его входе в атмосферу. В результате абляции фрагмент кометы теряет на этих высотах массу порядка

$$m_a \approx C_H \rho(h) v^2 S \Delta / Q, \quad (1)$$

где $\rho(h)$ - плотность атмосферного газа на высоте h (в рассматриваемом случае $h \approx 200$ км), v - скорость фрагмента, S - площадь поперечного сечения, Δ - шкала высот юпитерианской атмосферы (для высотного профиля плотности мы используем следующее выражение [11]: $\rho = \rho_0 \exp(-h/\Delta)$, $\Delta \approx 25$ км для $h \geq 0$, $\rho = \rho_0(1 - h/\Delta)^{2.27}$, $\Delta \approx 75$ км для $h \leq 0$), Q - теплота испарения кометного вещества, C_H - коэффициент теплопередачи (при торможении осколка SL9 на рассматриваемых высотах $C_H \sim 0.1$). Для километрового осколка $m_a \sim 10^{10}$ г, что также может объяснить наблюдаемое свечение атомов металлов.

Однако указанные механизмы не могут объяснить появление в стратосфере значительных количеств рассмотренных выше молекул, которые по-видимому были синтезированы в более глубоких слоях атмосферы при взрыве осколка и выброшены в верхнюю атмосферу ударной волной.

Высвобождаемая в результате торможения осколка кометы тепловая энергия приводит к взрыву и генерации сильной ударной волны (УВ) [1], верхняя часть которой при распространении в сторону уменьшения плотности ускоряется. При этом в верхнюю атмосферу выбрасывается нагретый УВ газ. Если быть более точным, УВ сначала тормозится и начинает ускоряться, лишь пройдя расстояние порядка 3Δ от места взрыва [12]. По этой причине в выбрасываемом газе мало кометного вещества - УВ выбрасывает вверх главным образом газ юпитерианской атмосферы. Необходимо отметить, что, хотя скорость УВ и растет при приближении к точке взрыва, однако газ, вовлеченный в такое движение, не может быть выброшен в верхнюю атмосферу, поскольку он тормозится на расстояниях $\approx \Delta$ и значительно ниже высот, где сосредоточены обсуждаемые молекулы.

При высоких температурах и давлениях ударно-сжатый газ находится в термодинамическом равновесии. По мере расширения и охлаждения газа скорость химических реакций падает и характерное время химической релаксации растет. Когда время релаксации становится сравнимым с характерным временем изменения температуры расширяющегося газа, возникает эффект закалки, и в дальнейшем относительные концентрации молекул практически не меняются, оставаясь на уровне, соответствующем равновесной концентрации при температуре, давлении и элементном составе газа во время закалки. Таким образом, закаленные молекулы являются своеобразной "памятью" об ударно-волновых процессах и по их содержанию можно, в принципе, восстановить параметры взрыва.

Определить параметры закалки можно на основании констант скоростей кинетических процессов. Резкая зависимость концентрации большинства соединений от начальных условий позволяет оценить температуру, давление и элементный состав горячего газа в момент закалки путем сравнения результатов термохимических расчетов с данными наблюдений.

Наиболее полные кинетические данные имеются для O-соединений [13]. При высоких температурах ($T \geq 2000$ К) в условиях термодинамического равновесия при $[O] \leq [C]$ практически весь кислород связывается в CO. С понижением температуры равновесная концентрация воды растет. Закалка воды происходит при прекращении реакций:



Например, при давлении 1 бар конверсия CO в H_2O прекращается при 1400 К. Термохимические расчеты при $T = 1400$ К показывают, что CO является основным кислородсодержащим соединением при $[O]/[C] \leq 1$ и давлении $p \leq 2$ бар. Остальные O-соединения (прежде всего, H_2O , CO_2 , OH, OCS) присутствуют в таком газе в намного меньших количествах.

Лишь при падении наиболее крупных фрагментов зарегистрировано излучение H_2O , причем для фрагмента G $q_{H_2O} \approx 10^{-7}$. Данные термохимических расчетов согласуются с этими наблюдениями при давлении $p \approx 0.3 - 3$ бар и $O/C = 0.03 - 0.5$. Значение $[O]/[C] \leq 0.5$ не только подтверждается незначительным содержанием обнаруженной воды, но и тем, что при $[O]/[C] \geq 0.5$ наблюдается резкое сокращение содержания HCN, C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , CS, CS_2 , что противоречит наблюдательным данным.

Полагая, что давление закалки ≈ 1 бар, перепад давлений в УВ $\delta p/p \approx 10$, оценим сверху глубину взрыва осколка G: $h_e \approx h(p = 0.1 \text{ бар}) - 3\Delta \approx -50$ км.

Оценим теперь глубину взрыва осколка G, исходя из наблюдаемой массы стратосферного CO. Если предположить, что кислород в CO имеет юпитерианское происхождение, то выброс газа происходил с уровня $p \approx 5 - 10$ бар, поскольку на этом уровне находятся водяные облака. В этом случае осколок G проник на глубину $h \leq -250$ км и его размер, согласно [14], был не менее четырех километров. Поскольку CO наблюдался при ударе других, заведомо более мелких осколков C, D, R, W, то, скорее всего, кислород в наблюдаемом CO имел кометное происхождение.

Считая, что CO есть результат ударной химии в метеорном следе и зная его массу ($\sim 10^{14}$ г), определим высоты h_{ej} , с которых происходил выброс окиси углерода. При этом мы считаем, что УВ идет вверх по метеорному следу (хотя угол входа осколков SL9 в атмосферу составлял $\approx 45^\circ$, результаты численных расчетов [15] подтверждают это предположение), так что УВ вовлекает в движение все кометное вещество, находящееся в следе. Воспользовавшись (1), получим, что $h_{ej} \approx 20 - 30$ км, следовательно, взрыв осколка G происходил не выше высот $h_e \approx h_{ej} - 3\Delta \approx -120$ км. Это соответствует диаметру осколка $G \approx 2$ км. Для осколка L наблюдаемое количество окиси углерода примерно на порядок ниже, а глубина проникновения составляет ≈ -80 км.

Дополнительную информацию о глубинах проникновения осколков SL9 дают данные о содержании азотных и углеродных соединений в местах ударов. Результаты термодинамических расчетов качественно согласуются с данными наблюдений этих соединений при температуре и давлении закалки 1000-1400 К

и 0.01–0.3 бар, соответственно. Если рассмотренные соединения были бы образованы в огненном шаре (области взрыва) и подняты в стратосферу при его всплывании, то в этом случае давления закалки были бы гораздо выше, что говорит в пользу гипотезы выброса этих соединений ударной волной.

Поэтому, скорее всего, насыщенные углеводороды были выброшены в стратосферу планеты из глубоких слоев атмосферы планеты, а ненасыщенные были синтезированы в процессах ударной химии. Аммиак, содержащийся в верхнем облачном слое, является хорошим детектором ударных процессов, поскольку в процессах ударной химии он превращается в N_2 и HCN. Молекулы NH_3 и HCN наблюдались в местах падений многих осколков. Этот факт можно интерпретировать как то, что эти фрагменты достигли уровня аммиачных облаков ($p \approx 0.6$ бар, $h \approx 20$ км). Условие выброса газа с этих высот дает для глубины проникновения h_e оценку: $h_e \approx -120$ км. При этом мы молчаливо подразумевали, что весь азот-юпитерианского происхождения. Если это не так, то указанная высота дает нижнюю оценку глубины взрыва.

Наконец, в местах некоторых ударов наблюдалось аномально высокое содержание серы S_2 . Согласно [8], было синтезировано $\approx 10^{13}$ г S_2 . Теория закалки не объясняет наблюдаемых содержаний S-соединений в интервале параметров, охватывающих все мыслимые варианты удара.

Предполагая, что серосодержащие соединения были синтезированы при прохождении ударной волны через слой облаков NH_4SH ($p \approx 1.5$ бар, $h \approx -10$ км), получаем, что в этом случае глубина проникновения фрагмента составляет ≈ -180 км, а его характерный размер $\approx 2.5 - 3$ км. Предположим, что наблюдаемая сера – кометного происхождения. Поскольку в месте падения осколка в наблюдаемое количество $CO \approx 10^{14}$ г, а $S_2 \approx 10^{13}$ г, то приходим к выводу, что в кометном веществе отношение $[O]/[S] \approx 5$. Глубина проникновения в случае удара G: $h_e \approx -120$ км.

Видно, что размеры наиболее крупных осколков кометы SL9 во всех рассмотренных случаях порядка 2-3 км, а их начальные энергии $E_0 \approx 10^{29} - 10^{30}$ эрг. Таким образом, данные наблюдений содержания молекул, синтезированных ударом, говорят в пользу модели глубокого проникновения осколков SL9 в атмосферу Юпитера и косвенно подтверждают оценки размеров и энергии наиболее крупных фрагментов, сделанные в работе [1].

Б.А.Клумов был поддержан Российским фондом фундаментальных исследований (грант 95-02-03880).

1. А.В.Ивлев, Б.А.Клумов, В.Е.Фортов, Письма в ЖЭТФ **61**, 423 (1995).
2. K.Zahnle and M.M.MacLow, J. Geophys. Res. 1996, in press.
3. Th.Encrenaz, R.Schulz, J.A.Stuwe et al., ESO SL9 Proceeding 1995, p. 215.
4. R.West, ESO Messenger **77**, 28, (1994).
5. D.Bockelee-Morvan, E.Lellouch, P.Colom et al., ESO SL9 Proceeding 1995, p.251.
6. D.Gautier, A.Marten, M.J.Griffith et al., Ibid. 1995, p.257.
7. L.S.Orton, Ibid. 1995, p.123.
8. K.S.Noll, M.A.Mcgrath, L.M.Trafton et al., Science **267**, 1307 (1995).
9. M.Roos-Serote, A.Borucci, J.Crovisier et al., Geophys. Res. Letter **22**, 1621 (1995).
10. H.A.Weaver, M.F.A'Hearn, C.Arpigny et al., Science **267**, 1282 (1995).
11. K.Zahnle and M.M.Mac Low, Icarus **108**, 1282 (1995).
12. А.С.Компанец, ДАН СССР **130**, 1001 (1960).
13. B.J.Fegley and K.Lodders, Icarus, **110**, 117 (1995).
14. V.K. Gryaznov, B.A. Ivanov, A.V. Ivlev et al., Moon, Earth, and Planets **66**, 99, (1994).
15. M.B.Boslough, D.A.Crawford, A.C.Robinson et al., Geophys. Res. Lett. **21**, 1555 (1994).